

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

PARAMETRY PRACOVNÍHO PROSTŘEDÍ A JEJICH MĚŘENÍ

WORK ENVIRONMENT PARAMETERS AND THEIR MEASUREMENT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

VOJTĚCH HAVLÍČEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. JANA KOŠÍKOVÁ

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automatizace a informatiky

Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Vojtěch Havlíček

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Parametry pracovního prostředí a jejich měření

v anglickém jazyce:

Work Environment Parameters and their Measurement

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Rešeršní studie zabývající se možnostmi měření parametrů pracovního prostředí, které ovlivňují pohodu člověka a následně i kvalitu jeho práce.

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je studie, která uvede přehled jednotlivých parametrů ovlivňujících pracovní prostředí a pohodu člověka a následně se zaměří na metody a prostředky měření těchto parametrů.

Doporučená osnova práce:

1. Pracovní prostředí a tepelná pohoda
2. Přehled parametrů charakterizujících prostředí a pohodu
3. Možnosti měření základních parametrů

Seznam odborné literatury:

JANOTKOVÁ, E. Technika prostředí : Brno : Ediční středisko VUT v Brně 1991. 201s. ISBN 80-214-0258-X.

NOVÝ, R. Technika prostředí. 1.vydání :Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. 265 s. ISBN 80-01-02108-4.

Pavelek, M.;Štětina, J. Experimentální metody v technice prostředí. :Brno: Ediční středisko VUT v Brně 2007.215 s. ISBN 978-80-214-3426-4

Firemní literatura

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jana Košíková

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 16.11.2010

L.S.

Ing. Jan Roupec, Ph.D.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá parametry pracovního prostředí a jejich měřením. Pracovnímu prostředí se v dnešní době věnuje velká pozornost, protože výrazně ovlivňuje pohodu a výkony člověka. Jeho vhodnou optimalizací lze současně docílit výrazných ekonomických úspor a zvýšení komfortu pracujících osob.

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the work environments parameters and their measurements. The work environment is being paid a lot of attention nowadays, because it significantly affects the comfort and work performance. With the suitable optimisation we can achieve significant economic savings and increase the comfort of the employees.

KLÍČOVÁ SLOVA

Pracovní prostředí, parametry pracovního prostředí, měření, tepelná pohoda, střední radiační teplota

KEYWORDS

Work environment, parameters of work environment, measurement, thermal comfort, medium radiant temperature

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE PRÁCE

HAVLÍČEK, V. *Parametry pracovního prostředí a jejich měření*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 42 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jana Košíková.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, dle pokynů vedoucího bakalářské práce. Všechny podklady, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně uvedeny v seznamu použité literatury.

V Brně dne 26. 5. 20011

.....
podpis

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval Ing. Janě Košíkové a Ing. Františku Vdolečkovi, CSc. za cenné rady a připomínky při zpracování bakalářské práce.

Obsah:

	Zadání závěrečné práce.....	3
	Abstrakt.....	5
1	Úvod.....	11
2	Pracovní prostředí.....	13
2.1	Hlavní mikroklimatické činitelé	13
2.2	Vedlejší mikroklimatické činitelé.....	13
2.3	Optimální stav prostředí.....	13
2.4	Tepelná pohoda pracovního prostředí.....	13
2.4.1	Termoregulace lidského těla.....	14
2.4.2	Rovnice tepelné pohody.....	14
3	Parametry pracovního prostředí	17
3.1	Parametry měřitelné.....	17
3.2	Parametry statistické.....	19
3.2.1	Ukazatel PMV.....	19
3.2.2	Ukazatel PPD.....	20
3.2.3	Ukazatel DR	20
4	Měření vybraných parametrů prostředí.....	23
4.1	Měření teploty.....	23
4.1.1	Dilatační teploměry.....	23
4.1.2	Odporové teploměry.....	25
4.1.3	Termoelektrické teploměry	26
4.2	Stanovení střední radiační teploty.....	27
4.2.1	Kulový teploměr.....	27
4.2.2	Dvoukulový radiometr	28
4.2.3	Čidlo konstantní teploty	28
4.2.4	Stanovení střední radiační teploty dvěma katateploměry	28
4.2.5	Využití softwaru MRT Analysis	29
4.3	Měření rychlosti proudění vzduchu.....	30
4.3.1	Rotační anemometry (lopatkové a miskové).....	31
4.3.2	Žárové anemometry (termoanemometry).....	31
4.3.3	Katateploměry.....	32
4.4	Měření vlhkosti vzduchu.....	32
4.4.1	Gravimetrická metoda.....	32
4.4.2	Dilatační vlhkoměry (hygrometry).....	33
4.4.3	Psychrometry.....	34
4.5	Tepelný stav mikroklimatu.....	35
4.5.1	Katateploměr dle Hilla	35
4.5.2	Měřič tepelného komfortu.....	35
5	Závěr.....	37
	Seznam použité literatury.....	39
	Seznam použitých symbolů a zkratek.....	41

1 ÚVOD

Pracovní prostředí je prostředí, v kterém člověk tráví velkou část svého času a proto je nezbytně nutné, aby se v tomto prostředí cítil co nejlépe. Na člověka v pracovním prostředí působí celá řada činitelů. Z těchto činitelů jsou některé psychologického charakteru, jiné činitele fyzikální povahy. Činitele psychologického charakteru můžeme jen stěží ovlivnit, mezi ně například patří mezilidské vztahy na pracovišti, psychický stav osob. Činitele fyzikální povahy, jejichž působení můžeme pomocí technických zařízení velice dobře ovlivnit a tím je přizpůsobit potřebám pracujících osob. Optimalizací ovlivnitelných fyzikálních parametrů dosáhneme lepšího fyzického pocitu, který v konečném působení ovlivní i psychický stav člověka a tím dojde ke zlepšení jeho pracovních výsledků.

Ve své bakalářské práci se budu nadále primárně zabývat základními parametry vnitřního pracovního prostředí s jistým důrazem na pocit tepelné pohody. První část této práce je zaměřena na definici pracovního prostředí a tepelné pohody. V druhé části se budeme věnovat výčtu a definici základních parametrů pracovního prostředí. Poslední část práce se týká měření vybraných základních parametrů.

2 PRACOVNÍ PROSTŘEDÍ

Pojem pracovní prostředí chápeme jako soubor činitelů působících na činnost člověka v určitém prostoru nebo také soubor podmínek, za jakých se uskutečňuje pracovní proces. Kvalita pracovního prostředí se hodnotí podle stavu okolních činitelů prostředí. Tito činitelé zahrnují veškeré změny parametrů pracovního prostředí, které přímo či nepřímo působí na smyslové chápání člověka a mají vliv na jeho fyzický a psychický stav. [1]

2.1 Hlavní mikroklimatické činitelé

- ♦ čistota okolního vzduchu
- ♦ teplota vzduchu
- ♦ teplota povrchu stěn a předmětů
- ♦ rychlost proudění vzduchu
- ♦ vlhkost vzduchu
- ♦ oděv
- ♦ intenzita osvětlení
- ♦ hluk, vibrace
- ♦ koncentrace iontů ve vzduchu
- ♦ intenzita elektrických a magnetických polí
- ♦ intenzita ionizujícího záření
- ♦ ergonomické řešení prostředí
- ♦ schopnost aklimatizace
- ♦ klima, rasové zvláštnosti a návyky lidí. [1]

2.2 Vedlejší mikroklimatické činitelé

- ♦ tlak vzduchu
- ♦ psychický stav osoby
- ♦ fyzická omezení atd. [1]

2.3 Optimální stav prostředí

Optimální stav prostředí je takový stav mikroklimatu, který poskytuje ideální podmínky pro zdravý pocit a kreativní práci. Tento optimální stav pracovního prostředí se nazývá pohoda prostředí. Pohodu prostředí cítí člověk jako celek, avšak jednotlivé smysly dělí tento komplexní pocit na základní skupiny, hovoříme tedy o tepelné, akustické a světelné pohodě. Pomocí technických zařízení je možné většinu těchto činitelů modifikovat. Proto je důležité zabývat se pracovním prostředím, neboť jej můžeme optimalizovat a tím efektivně přizpůsobit člověku a jednotlivým druhům práce. Pomocí technických zařízení je možné většinu těchto činitelů efektivně upravit a efektivně přizpůsobit člověku a jednotlivým druhům práce. [1]

2.4 Tepelná pohoda pracovního prostředí

Tepelná pohoda je definována jako pocit spokojenosti s tepelným stavem prostředí. Základním předpokladem tepelné pohody je rovnováha tepelného režimu lidského těla nutná k udržení stále tělesné teploty těla při konkrétních okolních podmínkách.

Při biochemických oxidačních procesech (metabolické procesy) probíhajících v lidském těle dochází k tvorbě tepla, jedná se o metabolické teplo, které se přenáší do okolí. Množství uvolněného tepla závisí na mnoha faktorech, jedním z hlavních faktorů je intenzita fyzické činnosti a hmotnost člověka. Pouze malá část z této energie je přeměněna na mechanickou energii a většina z ní (až 90%)

se projevuje jako energie tepelná. V Tab. 1 je uveden přibližný přehled hustoty metabolického tepelného toku q v závislosti na typu činnosti. [1]

Tab. 1 Závislost hustoty metabolického tepelného toku na druhu činnosti. [1]

Druh činnosti	Hustota metabolického tepelného toku q [W.m ⁻²]
Klidný spánek	40
Klidné sezení	58
Uvolněné stání	70
Kancelářské práce	65 - 70
Velmi lehká fyzická práce	80 - 100
Lehká fyzická práce (mechanici, svařeči)	100 - 120
Středně těžká práce (kováři, slévači)	120 - 160
Těžká fyzická práce	180 - 380
Basketbal	440

2.4.1 Termoregulace lidského těla

Tělesná teplota zdravého člověka by měla zůstat v určitých intervalech, asi $36,5 \pm 0,5$ °C a proto musí být teplo vytvořené v těle odváděno do okolí. Přenos tepla probíhá několika mechanismy: vedením, konvekcí, sáláním, vypařováním a dýcháním. Tělo reguluje svou teplotu vnitřním termoregulačním systémem. Při pocitu chladu, kdy množství odvedeného tepla je větší než množství tepla přivedeného, dochází ke zvýšení tepla intenzivnějšími látkovými přeměnami (chemickými regulacemi) nebo ke stažení svalových vláken, které svírají krevní cévy nacházející se na periferiích končetin (vazomotorická regulace). Při pocitu tepla dochází naopak k rozšíření cév pokožky, cévy tak předávají větší část tepla kůži, z které se pak teplo odvádí do okolního prostředí. Pokud je odvod tepla nedostatečný i navzdory těmto opatřením, dochází ke zvýšené produkci potu a teplo se odvádí odpařováním. Pokud tělo využije všechny svoje regulační mechanismy a přesto není schopno dosáhnout tepelné rovnováhy, dochází k ohrožení života podchlazením nebo přehřátím. [1]

Kromě uvedených vnitřních termoregulačních procesů, které se vykonávají nevědomě a bez zásahu vůle, dochází také k vědomé termoregulaci. K takovýmto procesům patří např.:

- ♦ změna tělesné činnosti
- ♦ změna polohy těla, které se podílí na výměně tepla (větším oddálením končetin od těla a nebo naopak "schoulením se")
- ♦ změna oblečení
- ♦ změna teploty prostředí. [1]

2.4.2 Rovnice tepelné pohody

První podmínkou dosažení tepelné pohody je, aby byla splněna rovnice tepelné rovnováhy. Pro pocit tepelné pohody je však také důležité, jakým způsobem bylo dané rovnováhy dosaženo. Nelze např. mluvit o tepelné pohodě, pokud je tepelná rovnováha dosažena tím, že tělo produkuje zvýšené množství potu a tím odvádí přebytečné teplo. Lze tedy konstatovat, že tepelné pohody musí být dosaženo tak, aby nebylo zapotřebí větších zásahů vnitřního termoregulačního systému. [1]

Rovnice tepelné pohody má tvar [2]:

$$\begin{aligned} q_m - n = & \alpha_{kf_{od}}(t_{od} - t) + \alpha_{rf_{od}}(t_{od} - t_r) + \\ & + 3,06 \cdot 10^{-3} \{ 256 [35,7 - 0,0275(q_m - n)] - p_d - 3373 \} + \\ & + 0,45(q_m - n - 58,15) + 2,58 \cdot 10^{-6} \frac{q_m}{S} (h_{vyd} - h) \end{aligned} \quad (1)$$

3 PARAMETRY PRACOVNÍHO PROSTŘEDÍ

Parametry pracovního prostředí jsou důležité, neboť je možno většinu těchto parametrů měřit pomocí známých postupů a tím zhodnotit skutečný stav pracovního prostředí. Tyto parametry se dělí na dvě základní skupiny, a to na parametry měřitelné, jakožto teplota, střední radiační teplota, vlhkost vzduchu, tlak, hluk, vibrace, nebo na parametry statistického typu, mezi které patří *PMV* (Predicted Mean Vote), v českých normách označen jako předpověď středního tepelného pocitu a parametr *PPD* (Predicted Percentage of Dissatisfied), který je v českých normách označován jako procentuální podíl nespokojených. Tyto dva parametry mohou být stanoveny podle přibližných výpočtů, ale skutečná hodnota těchto parametrů závisí na daném pocitu lidí ve statistickém výběru, jehož se tyto parametry týkají.

Parametrů pracovního prostředí je nepřeberné množství, záleží na tom, o jaké pracovní prostředí se jedná, jedná-li se o venkovní pracovní prostředí, vnitřní pracovní prostředí, nebo jedná-li se o práci ve speciálních podmínkách. V této práci se budeme zabývat základními parametry, které jsou stěžejní pro vnitřní pracovní prostředí.

3.1 Parametry měřitelné

➤ Teplota

„Teplota je makroskopickým projevem tepelného pohybu molekul v látce, přičemž je přímo úměrná střední kinetické energii pohybu molekul.“ [3]

Teplota je základní fyzikální a termodynamickou stavovou veličinou. Základní jednotkou teploty je Kelvin, značen jako K, vedlejší, značně rozšířenou jednotkou, je °C. Méně známé stupnice, jako je Fahrenheitova, Rankinova atd. Absolutní nula, neboli nejnižší možná dosažitelná teplota má v Kelvinově stupnici hodnotu 0 K, této hodnotě odpovídá -273,15 °C. Teplota je důležitou veličinou projevující se v mnoha fyzikálních jevech a závisí na ní celá škála chemických, mechanických a elektromagnetických vlastností látek.

➤ Střední radiační teplota

„Střední radiační teplota je rovnoměrná teplota pomyslného vymezeného prostoru, ve kterém se přenos radiačního tepla z lidského těla rovná přenosu radiačního tepla ve skutečném nerovnoměrném prostoru.“ [4]

Střední radiační teplotu je možno buď měřit, např. pomocí kulového teploměru, nebo vypočítat na základě naměřených teplot povrchů okolních těles, tvaru těchto povrchů a jejich polohy vzhledem k poloze, v níž měříme radiační teplotu. [5]

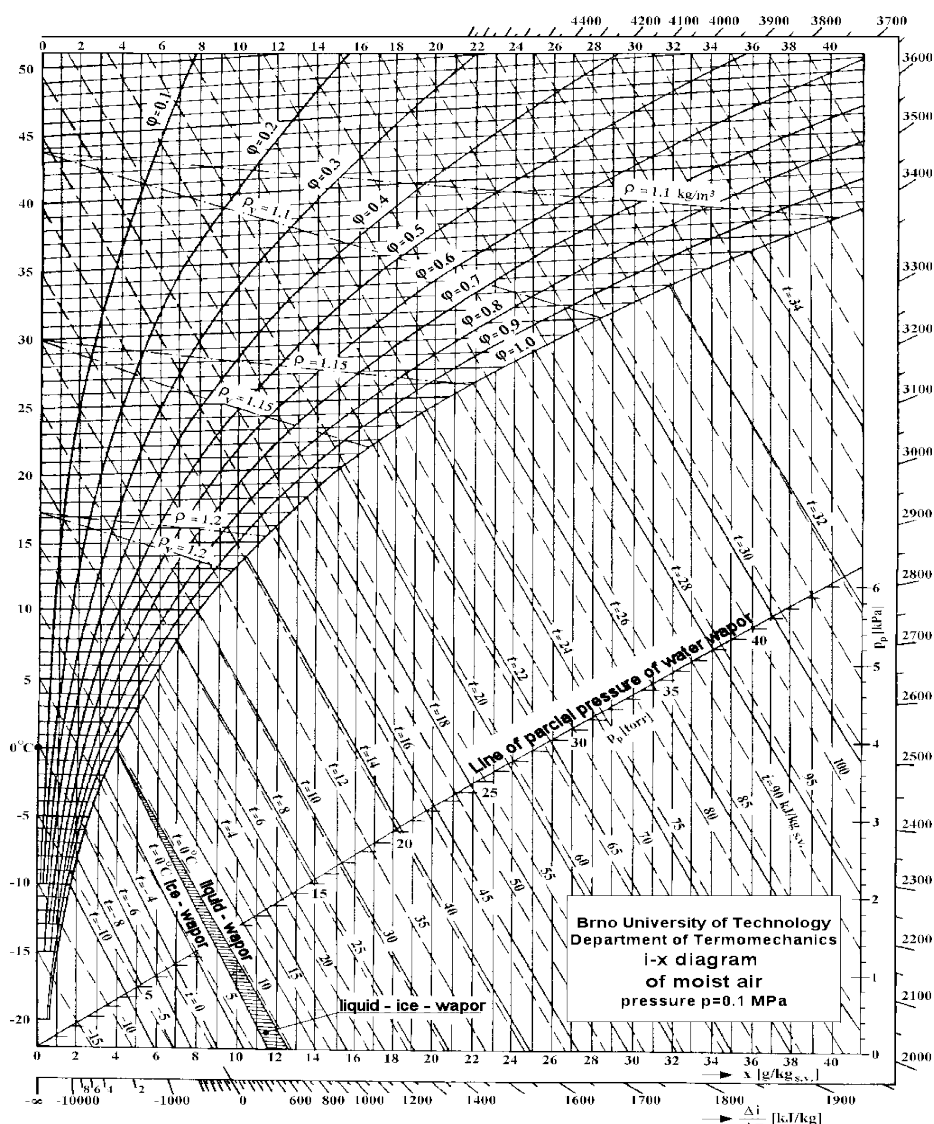
➤ Asymetrie radiační teploty

„Asymetrie radiační teploty je rozdíl mezi rovinnými radiačními teplotami dvou protilehlých ploch malého rovinného prvku.“ [4]

Asymetrie radiační teploty se nejvíce využívá, když běžné měření radiační teploty nepokryje danou přesnost měření z důvodů velkých teplotních diferencí různých povrchů. Asymetrické radiační pole je vztaženo k referenčnímu rovinnému prvku. Asymetrie radiační teploty je měřena nebo vypočítána z naměřených hodnot radiačních teplot různých povrchů. [4]

➤ Vlhkost vzduchu

Relativní vlhkost vzduchu udává poměrné množství vodních par obsažených ve vzduchu při daném stavu vzduchu vůči maximálnímu nasycení vzduchu vodními parami při daném stavu. Pro přibližné určení vlhkosti vzduchu se používá Molierův i-x diagram, viz Obr. 1.



Obr. 1 Molierův i-x diagram. [6]

Absolutní vlhkost vzduchu charakterizuje skutečné množství vodní páry obsažené ve vzduchu. Vyjadřuje hmotnost vodní páry obsažené v jednotce objemu vzduchu, jako jednotka se používá $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ a dá se proto také hovořit o hustotě vodní páry ρ_v .

➤ Tlak

Tlak je obecně definován jako síla působící kolmo na jednotkovou plochu. V technice prostředí, spojené s bezprostředním působením tlaku na člověka, nás ovšem nejvíce zajímá působení atmosférického tlaku. Tlak atmosférického vzduchu je dle Daltonova zákona dán součtem parciálních tlaků všech plynných složek atmosféry a vodní páry. Základní jednotkou tlaku v soustavě SI je Pascal Pa, jenž odpovídá rovnoměrně spojitému působení síly o velikosti 1 N na plochu o velikosti 1 m^2 . Jednotka Pascal je pro běžné použití velice malou mírou tlaku, proto se většinou používají její násobky označené předponami soustavy SI, jako jsou přípony kilo, mega, giga, jednou z výjimek je barometrický tlak, pro který se používá jednotka hPa, odpovídající 100 Pa. V minulosti se hojně používalo jednotek jako jsou 1 bar, 1 kilopond na metr čtvereční, 1 atmosféra, 1 Torr, 1 hPa je roven staršímu vyjádření 1 milibar.

➤ Rychlost proudění vzduchu

„Rychlost vzduchu je veličina, která je určena svojí velikostí a směrem. V prostředí s tepelným působením jde o efektivní rychlost vzduchu, tj. velikost vektoru rychlosti proudu vzduchu v uvažovaném místě měření.“ [4]

Rychlost proudění vzduchu je udávána v m.s^{-1} . Tento parametr je velice důležitý, neboť proudící vzduch velice narušuje tepelnou pohodu člověka a je to nepostradatelný parametr pro řešení správného větrání prostor, především v pracovních oblastech, kde se nacházejí lidé a jsou proudícím vzduchem přímo ovlivňováni. Vzhledem k tomu, že proudící vzduch má často jinou teplotu než je teplota okolí, je tento jev většinou osob velice nepříjemný. V souvislosti s proudícím vzduchem se používají statistické metody, kdy se určuje procentuální počet osob, které by mohli být průvanem obtěžovány. [7]

➤ Hluk

Hlukem můžeme označit veškeré nežádoucí zvuky. Obecně s postupem doby hluku kolem nás přibývá, jezdí více automobilů, ve firmách dochází k většímu využití automatizace a tím používání většího počtu strojů, které jsou zdrojem hluku. Vystavení hluku v nepřiměřené míře může vyvolávat závažné zdravotní problémy. Proto je nutno tento parametr obezřetně kontrolovat.

Pro měření a stanovení míry hluku v pracovním prostředí se dle nařízení vlády č. 502/2000 Sb. a nařízení vlády č. 88/2004 Sb. užívá ekvivalentní hladiny akustického tlaku $L_{\text{aeq},T}$. Tyto nařízení specifikují i nejvyšší možná hluková zatížení pracovišť. [2]

3.2 Parametry statistické

Tyto parametry, mezi něž patří ukazatel předpovědi středního tepelného pocitu *PMV* (Predicted Mean Vote), procentuální podíl nespokojených *PPD* (Predicted Percentage of Dissatisfied) a stupeň obtěžování průvanem *DR* (Draught Rating), patří mezi parametry subjektivní, které se nedají přímo změřit a jejich přesná hodnota závisí až na statistickém zhodnocení v pozorovaném statistickém výběru. Tyto parametry se dají pouze předpovědět dle empirických matematických vzorců.

3.2.1 Ukazatel PMV

„Ukazatel PMV je definován jako funkce rozdílu tepelného toku produkovaného organismem a aktuálního toku tepla, který tělu prostředí odnímá.“ [2]

Ukazatel předpovědi středního tepelného pocitu *PMV* (Predicted Mean Vote) je založen na tepelné rovnováze lidského těla. Člověk je v tepelné rovnováze, pokud je vnitřní produkce tepla v jeho těle stejná jako tepelné ztráty do okolí. V mírném tepelném prostředí se člověk se změnou teploty vypořádává vnitřním termoregulačním systémem, který je schopen tělo udržet v tepelné rovnováze. Ukazatele *PMV* je možno stanovit, když se odhadne energetický výdej, tepelný odpor oděvu a změní se parametry prostředí jako jsou: teplota vzduchu, střední radiační teplota, relativní rychlost proudění vzduchu a parciální tlak páry. V ukazateli *PMV* je zahrnuta i fyziologická odezva termoregulačního systému na základě subjektivního pocitu přibližně 1300 testovaných subjektů. [7]

Ukazatel *PMV* je dle Fangerova vztahem [7]:

$$PMV = [0,303^{-0,036,q} + 0,028].L \quad [-] \quad (2)$$

Na základě číselného označení, byly číselným hodnotám přiřazeny slovní názvy, v Tab. 2 je znázorněna stupnice předpovědi středního tepelného pocitu.

Tab. 2 Stupnice předpovědi středního tepelného pocitu. [2]

PMV [-]	-3	-2	-1	0	1	2	3
Tepelný pocit	zima	chladno	mírně chladno	neutrálně	mírně teplo	teplo	horko

3.2.2 Ukazatel PPD

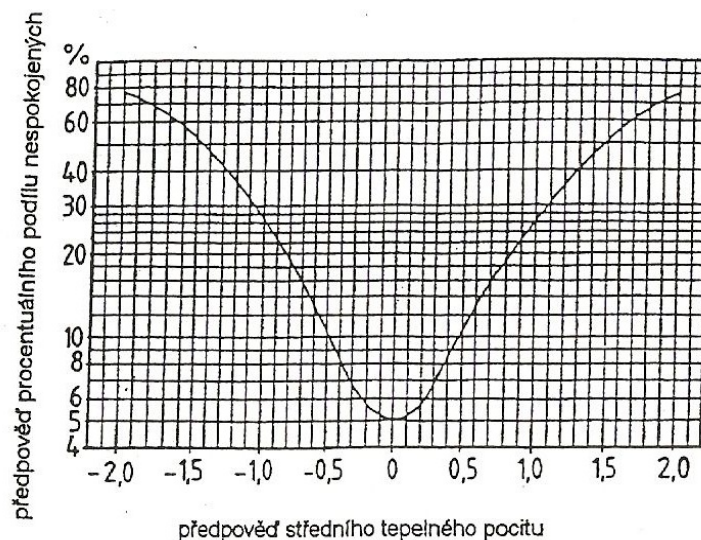
„Ukazatel PPD je kvantitativní předpověď poměrného počtu lidí, kteří budou nespokojeni s určitým mikroklimatem v jejich prostředí.“ [7]

Jelikož při určování *PMV* je výsledná hodnota určena pro velké množství pozorovaných subjektů, jejichž tepelné pocity se pohybují kolem střední hodnoty, je výhodné zavést hodnotu, která bude vyjadřovat počet lidí, kteří se nebudou shodovat se statistickou většinou a budou nespokojeni s tepelným stavem prostředí. Ukazatel procentuálního podílu nespokojených *PPD* (Predicted Percentage of Dissatisfied) vyjadřuje procentuální podíl pravděpodobně nespokojených se stavem tepelného prostředí. Tyto osoby pociťují buď velké horko nebo velkou zimu, na stupnici *PMV* tyto osoby volí stupně horko (+3), teplo (+2), chladno (-2) nebo zima (-3). [2]

Hodnota *PPD* je přímo spojena s hodnotou *PMV* a je dána vztahem [7]:

$$PPD = 100 - 95e^{-(0,03353 \cdot PMV^4 + 0,2179 \cdot PMV^2)} \quad [-] \quad (3)$$

Graficky je tato závislost zobrazena v Obr. 2.

**Obr. 2** PPD diagram v závislosti na *PMV*. [7]

3.2.3 Ukazatel DR

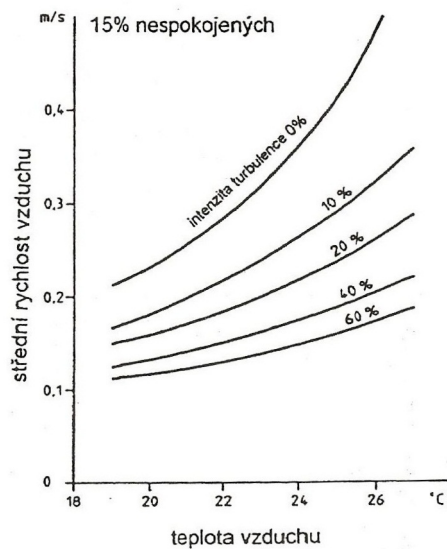
Průvan je proudění vzduchu, které může způsobit nežádoucí místní ochlazování lidského těla. Obtěžování průvanem je možno vyjádřit procentuálním podílem lidí, kteří pociťují, že jsou obtěžováni průvanem. Stupeň obtěžování průvanem je vyjádřen rovnicí [7]:

$$DR = (34 - t_a)(v - 0,05)^{0,62}(0,37 \cdot v \cdot Tu + 3,14) \quad [-], \quad (4)$$

kde v místní průměrná rychlost vzduchu $[\text{m.s}^{-1}]$

Tento vztah pro určení ukazatele DR (Draught Raiting) byl empiricky stanoven na základě pozorování na 150 osobách exponovaných teplotám vzduchu $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $26\text{ }^{\circ}\text{C}$, průměrným rychlostem vzduchu $0,05\text{ m.s}^{-1}$ až $0,4\text{ m.s}^{-1}$ a intenzitám turbulence $0\text{ }\%$ až $70\text{ }\%$. Pocit průvanu je u pozorovaných osob nižší při vyšší fyzické činnosti. [7]

Grafické znázornění vlivu střední rychlosti vzduchu, teploty a intenzity turbulence na parametr DR pro $15\text{ }\%$ nespokojených zobrazuje Obr. 3.



Obr. 3 Přípustná střední rychlost vzduchu jako funkce teploty vzduchu a intenzity turbulence. [7]

4 MĚŘENÍ VYBRANÝCH PARAMETRŮ PROSTŘEDÍ

Měření jednotlivých parametrů prostředí je nutné pro popsání stavu prostředí. Volba principu měření závisí především na požadovaném rozsahu měření, přesnosti měření, na prostředí, v kterém jsou parametry měřeny a jak dále budou tyto parametry zpracovány.

Chceme-li působení teploty a proudění vzduchu v heterogenním poli na osobu vhodně posoudit, musíme tyto parametry měřit v úrovni hlavy, břicha a kotníků dospělého člověka. Pokud člověk stojí, měříme tyto parametry ve výškách 1,7 m, 1,1 m a 0,1 m nad zemí, u osoby sedící jsou tyto hodnoty 1,1 m, 0,6 m a 0,1 m nad zemí. Pokud je pole homogenní, měříme tyto parametry pouze v úrovni břicha. [3]

4.1 Měření teploty

Při změně teploty dochází ke změně dalších fyzikálních vlastností, tyto změny lze využít pro měření teploty. Jedná se o změny rozměrů látek, změny tlaku tekutin v uzavřených prostorách (tyto změny korespondují s rozměrovými změnami), změny elektrických odporů, změny termoelektrických napětí ve styku dvou látek, změny kmitočtu krystalového výbrusu, změny intenzity a kvality vyzařování z povrchů, změny magnetických vlastností látek, změny barvy látek apod. Pro měření teplot lze použít všechny výše uvedené principy, stěžejní metody budou rozebrány v následujících podkapitolách.

4.1.1 Dilatační teploměry

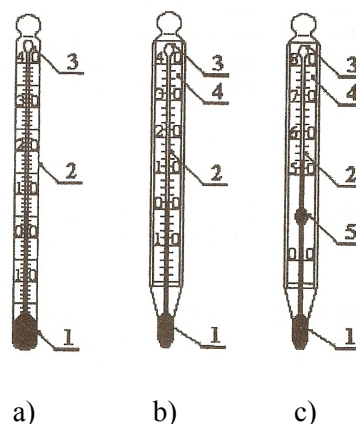
Tento typ teploměrů využívá k měření teploty změnu rozměrů teploměrné látky při změně teploty. Dilatační teploměry se dělí podle skupenství použité teploměrné látky. Rozlišujeme dilatační teploměry plynové, kapalinové a teploměry využívající tepelné roztažnosti pevných látek.

➤ Dilatační teploměry kapalinové

Mezi nejdůležitější a nejznámější dilatační kapalinové teploměry patří teploměry rtuťové, které jsou používány již od 18. století. Rtuť disponuje vhodnými vlastnostmi pro měření teplot, mezi které patří její roztažnost, dobrá tepelná vodivost, neprůhlednost, minimální stlačitelnost při působení tlaku, teplota tání -39 °C a teplota varu 357 °C při atmosférickém tlaku. Teplota varu se dá zvýšit navýšením tlaku nad hladinou rtuti až na 750 °C . Kromě rtuti se jako teploměrná látka používá také etanol (-110 °C až $+70\text{ °C}$), pentanolová směs (-200 °C až $+30\text{ °C}$). Pro extrémně vysoké teploty se používá cínový teploměr (až do $+1500\text{ °C}$) s porcelánovou nebo platinovou trubicí, teplota se čte na plováku a teploměr galliový (-15 °C až 1000 °C) s kapilárou z tavného křemene. Chyba kapalinových teploměrů bývá v rozmezí $0,2\text{ K}$ až 2 K , obvykle je velikost chyby srovnatelná s velikostí nejmenšího dílku stupnice. [3]

Dle konstrukce rozlišujeme dva základní typy dilatačních kapalinových teploměrů, a to teploměry tyčinkové a obalové viz Obr. 4. Tyčinkový kapalinový teploměr je tvořen teploměrnou nádobkou, teploměrnou kapilárou a koncovou jímkou, která slouží pro případ překročení jmenovitého rozsahu měření. Rozdíl v konstrukci obalového teploměru spočívá v tom, že teploměrná kapilára je umístěna ve speciálním ochranném skleněném obalu. V některých případech se do měřicí oblasti teploměrné kapiláry vkládá mezijímka, tímto dosáhneme nespojitě stupnice, teploměr má například rozsah od -15 °C do 5 °C a další část za mezijímkou má rozsah od 40 °C do 60 °C . [3]

- 1 - teploměrná nádobka
- 2 - teploměrná kapilára
- 3 - koncová jímka
- 4 - stupnice
- 5 - mezijímka



Obr. 4 Základní typy dilatačních kapalinových teploměrů. [3]

a) tyčinkový, b) obalový, c) s mezijímkou

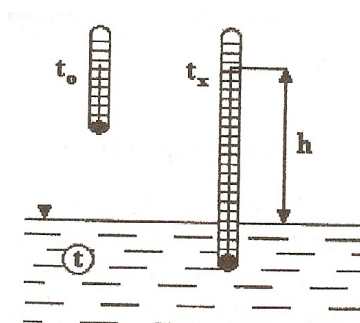
Při měření dilatačním kapalinovým teploměrem by se měl celý sloupec teploměrné kapaliny nacházet v prostředí, v kterém měříme teplotu. Jestliže tomu tak není, je nutno danou teplotu korigovat. Při tomto postupu se používá pomocný teploměr, který měří střední teplotu prostředí t_0 , kde se nachází určitá délka h vyčnívající části hlavního kapalinového teploměru (Obr. 5). Na hlavním kapalinovém teploměru je naměřena teplota t_x , kterou je nutno korigovat pomocí vztahů (5) a (6). [3]

$$\Delta t = (\beta_r - \beta_s) h (t_x - t_0) \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (5)$$

kde h délka vyčnívající části hlavního teploměru [m]

Tímto vztahem určíme rozdíl teploty t_x od měřené teploty t , která se vypočítá dle vztahu:

$$t = t_x + \Delta t \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (6)$$



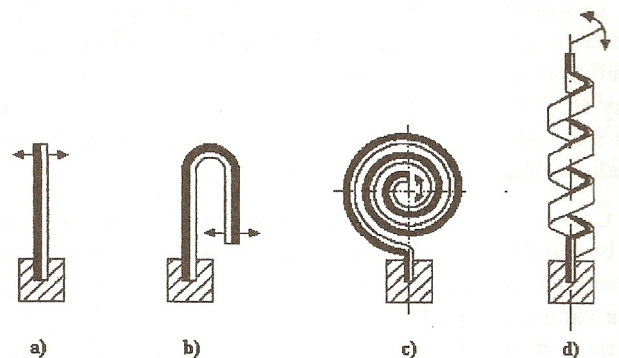
Obr. 5 Uspořádání pro přesné měření dilatačním kapalinovým teploměrem. [3]

➤ Dilatační teploměry kovové

Tyto teploměry jsou rozděleny na 2 skupiny, a to na monometalické (tyčové) a bimetalické, které se skládají z dvou teploměrných kovů. Monometalické teploměry jsou tvořeny válcovým pouzdem z kovu s vysokou tepelnou roztažností, uvnitř které je souose umístěn materiál s nízkou tepelnou roztažností nejčastěji invar, jenž se skládá z 36% Ni a 64% Fe. Z rozdílu rozměrů mezi tyčí

a pouzdrům způsobených změnou teploty se poté usuzuje teplota. Přesnost měření tyčovými teploměry je nízká, avšak tohoto principu se využívá v oblasti automatizace. [3]

Častěji se lze setkat s měřením pomocí bimetalických teploměrů, které jsou tvořeny dvěma kovy, které jsou svařeny a dále válcovány na požadované rozměry a tvary. Princip měření je založen na rozdílných tepelných roztažnostech v důsledku čehož dochází ke změně tvaru teploměrného tělesa. Měření pomocí bimetalických teploměrů se nejčastěji používá v regulaci nebo v indikačních přístrojích, ačkoliv se také nejedná o přesná měření. [3]



Obr. 6 Používané tvary bimetalických teploměrů. [3]

a) plochý, b) pásek ve tvaru U, c) plochá spirála, d) šroubovice

➤ Dilatační teploměry plynové

Plynové teploměry také využívají principu roztažnosti látek při změně teploty, avšak dělí se na 2 základní skupiny a to na stejnotlaké a stejnoobjemové. U stejnoobjemových plynových teploměrů je teploměrný plyn uzavřen v nádobě konstantního objemu a změnou teploty dochází ke změně tlaku. Vzhledem k tomuto faktu patří tento typ plynových teploměrů spíše do teploměrů talkových. U stejnotlakých teploměrů dochází změnou teploty ke změně objemu. Oba výše zmíněné způsoby patří mezi přesné metody, avšak v praxi se častěji využívá teploměrů stejnoobjemových, jelikož udržet konstantní tlak je technicky náročnější. [3]

4.1.2 Odporové teploměry

Jednou z možností měření teploty je měření elektrického odporu R [Ω], který se mění v závislosti na teplotě a v určitém rozsahu teplot je závislost změny teploty na změně odporu lineární. Tato linearita je popsána vztahem:

$$R = R_0 [1 + \alpha (t - t_0)] \text{ } [\Omega], \quad (7)$$

kde	α	teplotní součinitel odporu	[K ⁻¹]
	t_0	počáteční teplota	[°C]
	t	konečná teplota	[°C]

Při nutnosti dosažení vyšších přesností a větších měřicích rozsahů se závislost odporu na teplotě interpretuje polynomy vyšších stupňů. Velkou výhodou tohoto principu měření je elektrotechnická povaha veličiny, jež může být dobře zpracována výpočetní technikou, což tyto metody předurčuje k velkému využití v současné době automatizace a regulace. [3]

➤ Odporové teploměry z elektricky vodivých látek

Čidla pro tento druh měření bývají nejčastěji vyráběny z platiny, a to pro teploty do 600 °C, přechodně až do 1000 °C. Pro obdobné tepelné rozsahy se používá palladium. Pro nižší teploty je používán nikl (do 300 °C), zlato (do 400 °C), stříbro (do 250 °C), nebo jejich slitiny apod. Čidlo odporového teploměru je vyrobeno z drátku o průměru 0,01 mm až 0,1 mm a o délce přibližně 1 m, který je navinut na keramické těleso nebo slídový rámeček. Vodiče vedoucí k teplotnímu čidlu musí být z materiálu, který netvoří s odporovým drátem galvanický nebo termoelektrický článek. Běžné odporové teploměry mají chybu měření v rozsahu od 0,2 K do 2 K. [3]

➤ Polovodičové odporové teploměry

Polovodičové odporové teploměry se dělí dle druhu snímacího čidla na termistory NTC, na termistory PTC a na diody. Termistory NTC se záporným teplotním součinitelem, jinak také negistory jsou specifické tím, že při zahřátí odpor termistoru klesá. Naopak u termistorů PTC s kladným teplotním součinitelem, jinak také pozistorů, se odpor s rostoucí teplotou zvyšuje. Tímto měřením jsou měřeny teploty v rozsahu od -200 °C do 200 °C. Vyznačují se vysokým teplotním součinitelem odporu a proto jsou velice přesné, přesnost je uváděna až 10^{-5} K. Odporová tělíska jsou vyráběna z oxidů různých kovů (Mn, Co, Ni, Cu, Ti, aj.), které se rozemelou na prášek, přidají se další příměsi a poté se za vysokého tlaku slisují na požadovaný tvar, o rozměrech 1 mm – 10 mm, a poté se spékají při vysoké teplotě. Výhodou jejich malých rozměrů je malá teplotní setrvačnost, jež umožňuje měření teploty ve velice krátkých časových intervalech. Mezi další výhody patří elektronická povaha tohoto čidla, díky čemuž můžeme výsledné signály nadále zpracovat výpočetní technikou. Nevýhodou je jejich stárnutí, čímž se mění jejich vlastnosti a je nutné tyto čidla často cejchovat. Obecně se hodí k měření rychlých změn teplot, teploty povrchů, dotykových teploměrů apod. [3]

4.1.3 Termoelektrické teploměry

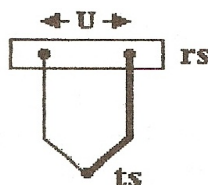
Funkce termoelektrických teploměrů je založena na funkci termočlánků. Termočlánek je složen z dvou různých vodičů, které jsou na jednom konci spojené svařením nebo spájením a na druhé straně jsou připojeny na svorkovnici. Zahříváním spoje dvou různých materiálů dochází k diferenci potenciálů, tzv. Peltier-Sebeckovu jevu, ze kterého lze určit teplota spoje. Termočlánky jsou vzhledem k jejich malým rozměrům používány pro dynamická měření a měření teplot povrchů. Příklady materiálových dvojic pro spoje termočlánků jsou uvedeny v tabulce Tab. 3., v technické praxi se můžeme setkat i s jinými kombinacemi materiálů. [3]

Tab. 3 Značení a tepelný rozsah základních materiálových dvojic [3]

Značení	Materiály	Barevné značení	Rozsah teplot [°C]
T	Cu - CuNi	Oranžová	-200 až 400
J	Fe - CuNi	Černá	-200 až 900
E	NiCr - CuNi	Hnědá	-200 až 900
K	NiCr - NiAl	Žlutá	-200 až 1300
S	PtRh10 - Pt	Zelená	0 až 1600
R	PtRh13 - Pt	Zelená	0 až 1600
B	PtRh30 - PtRh6	Fialová	300 až 1800
A	WRe5 - WRe20	-	0 až 2500

Termočlánky jsou buď plášťované, kde slouží jako obal nerezavějící ocel, inconel apod. nebo otevřené, které jsou bez pláště a izolace. K izolaci vodičů se nejčastěji používá stlačený MgO nebo Al_2O_3 . Krajiná náhodná chyba termočlánku se pohybuje kolem 0,2 K u laboratorních termočlánků a u provozních termočlánků se tato chyba pohybuje v řádech jednotek K, přičemž při vyšších teplotách chyba roste. [3]

Samotné zapojení termočlánku může být různé, můžeme použít pouze jednoho termočlánku, který je umístěn v měřeném prostředí, v tomto případě se jedná o přímé zapojení viz Obr. 7. Teplota mezi termočlánekem t_s a referenčními svorkami r_s je přímo úměrná diferencí napětí U vygenerovaného na termočlánek t_s . Pokud udržujeme na referenčních kontaktech známou teplotu, jsme schopni určit nominální teplotu v místě termočlánku t_s . V laboratorních podmínkách se používá vhodnější zapojení, kde je použit jako referenční spoj použit druhý termočlánek ponořený ve vodě s ledovou tříští, která zaručuje konstantní známou teplotu referenčního spoje. Měření termoelektrického napětí se provádí výchylkovou a kompenzační metodou. [3]



Obr. 7 Přímé zapojení. [3]

4.2 Stanovení střední radiační teploty

Vliv sálání okolních zdrojů tepla na osobu může být stanoven početně na základě daných rozměrů, teplotních charakteristik a polohy tepelných zdrojů v místnosti vzhledem k osobě, avšak tato metoda se stává se zvyšujícím se počtem tepelných zdrojů, jejich velikostí a složitosti jejich tvarů velice složitá. Je tedy výhodné používat přístroje, které umožňují stanovení radiační teploty měřením. Stanovení střední radiační teploty umožňují přístroje, které jsou schopny integrovat nerovnoměrné tepelné sálání z povrchů okolních ploch do střední hodnoty. Střední radiační teplotu je možno stanovit např. pomocí kulového teploměru, dvoukulového radiometru, čidla konstantní teploty a dvou katateploměry. [5]

4.2.1 Kulový teploměr

Kulový teploměr je tvořen kulovou baňkou z měděného plechu obvykle o průměru 100 mm nebo 150 mm s počerněným matným povrchem (teploměr dle Vernona), nebo s povrchem potaženým pěnovým polyuretanem (teploměr dle Vernon-Jokla), do níž je umístěn skleněný rtuťový teploměr. V ustáleném stavu je konvekční tepelný tok z povrchu koule do okolí v rovnováze se sálavým tepelným tokem z okolí do baňky. Teplota naměřená teploměrem uvnitř baňky v ustáleném stavu, která je dosažena po době 15 až 30 minut, se označuje jako teplota výsledná T_g . Tato teplota vyjadřuje současné působení teploty vzduchu, teploty okolních ploch a rychlosti vzduchu. [1]

Rovnice tepelné rovnováhy povrchu koule je [1]:

$$\alpha (T_g - T) = \varepsilon \sigma_0 (T_r^4 - T_g^4) \quad (8)$$

Jelikož je součinitel přestupu tepla pro nucenou konvekci na povrchu koule dán vztahem [1]

$$\alpha = \frac{6,3 \cdot w^{0,6}}{D^{0,4}} \text{ [W.m}^{-2}\text{.K}^{-1}\text{]}, \quad (9)$$

Lze střední radiační teplotu vypočítat ze vztahu [1]:

$$T_r = \sqrt[4]{T_g^4 + \frac{6,3 \cdot w^{0,6}}{\varepsilon \sigma_0 D^{0,4}} (T_g - T)} \quad [\text{K}]. \quad (10)$$

Při měření střední radiační teploty kulovým teploměrem je určená teplota přesná pouze pro objekt tvaru koule. Jelikož tvar lidského těla není obdobný tvaru koule, bude účinek na osobu stanovený kulovým teploměrem ze stropu a podlahy nadhodnocen. Pro měření účinků na osobu v heterogenním radiačním poli se proto používá postupu, kdy je střední radiační teplota měřena v úrovni hlavy, břicha a kotníků, z těchto tří hodnot je stanovena střední hodnota. Pro sedící osobu lze s dostatečnou přesností použít měření kulovým teploměrem, nebo je možné dosáhnout přesnější aproximace pro sedící i stojící osobou použitím elipsoidního tvaru snímače. Obecně lze konstatovat, že měření střední radiační teploty kulovým teploměrem, v souvislosti s povrchem lidského těla, patří mezi měření méně přesná. [3][4]

4.2.2 Dvoukulový radiometr

Metoda využívá pro stanovení střední radiační teploty dvou rozměrově stejných koulí s různými součiniteli poměrné zářivosti, jedna koule je lesklá a druhá je matně černá. Obě koule jsou zahřáty na stejnou teplotu a sleduje se rozdíl teplot mezi lesklou a černou koulí, jelikož jsou koule stejného rozměru, je jejich ochlazování prouděním stejné a rozdíl je pouze v hodnotě přijímané teploty zářením. Ke stanovení střední radiační teploty slouží vztah [5]:

$$T_r = \sqrt[4]{T_s^4 + \frac{P_1 - P_2}{\sigma_0 \cdot (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \cdot S}} \quad [\text{K}], \quad (11)$$

kde S povrch každého z čidel $[\text{m}^2]$

4.2.3 Čidlo konstantní teploty

Princip metody spočívá v tom, že čidlo, které má tvar koule nebo elipsoidu, má stejnou teplotu, jako je teplota prostředí a proudění vzduchu u něj nevyvolává změnu teploty. Změna teploty čidla je tedy úměrná pouze změně radiační teploty, která je dána vztahem [5]:

$$T_r = \sqrt[4]{T_s^4 - \frac{P_s}{\sigma_0 \cdot \varepsilon_s \cdot S}} \quad [\text{K}], \quad (12)$$

kde S povrch čidla $[\text{m}^2]$

4.2.4 Stanovení střední radiační teploty dvěma katateploměry

Pro měření touto metodou je zapotřebí dvou katateploměrů, jednoho Hillova katateploměru a jednoho katateploměru s pokovenou baňkou. Katateploměry umístíme tak, aby byly od sebe vzdáleny minimálně 150 mm ve vodorovném směru. Měření je prováděno tak, že jsou katateploměry zahřáty na teplotu 38 °C a poté je měřena doba τ_1 a τ_2 , za kterou se katateploměry ochladí z 38 °C na 35 °C. Dále je třeba měřit teplotu okolního prostředí t_a , kde je měření prováděno. [5]

Teplota q_1 a q_2 sdílené katateploměry, vztažené na 1 m^2 , při jejich ochlazení do okolí je dáno vztahy [5]:

$$q_1 = \alpha_c(36,5 - t_a)\tau_1 + \alpha_{r1}(36,5 - t_r)\tau_1 \text{ [J.m}^{-2}\text{]}, \quad (13)$$

$$q_2 = \alpha_c(36,5 - t_a)\tau_2 + \alpha_{r2}(36,5 - t_r)\tau_2 \text{ [J.m}^{-2}\text{]} \quad (14)$$

a součinitel přestupu tepla konvekcí pro oba katateploměry je vyjádřen jako:

$$\alpha_{r1} = \varepsilon_1 \sigma_0 \cdot \frac{(273,15 + 36,5)^4 - T_r^4}{36,5 - t_r} \text{ [W.m}^{-2}\text{.K}^{-1}\text{]}, \quad (15)$$

$$\alpha_{r2} = \varepsilon_2 \sigma_0 \cdot \frac{(273,15 + 36,5)^4 - T_r^4}{36,5 - t_r} \text{ [W.m}^{-2}\text{.K}^{-1}\text{]}, \quad (16)$$

kde	ε_1	poměrná emisivita Hillova kateploměru	[-]
	ε_2	poměrná emisivita katatelpoměru s pokovenou baňkou	[-]

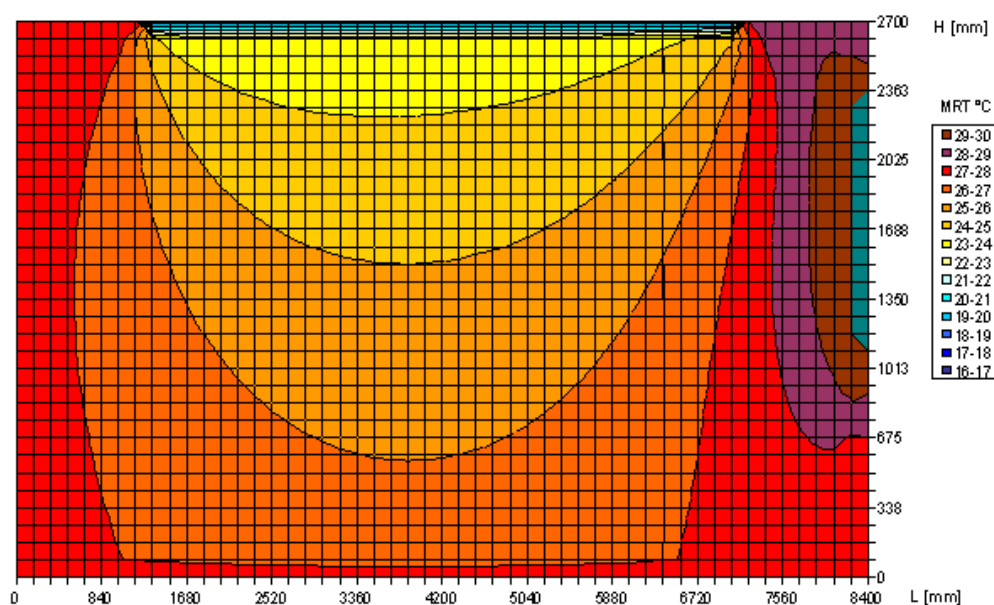
Dosazením vztahu (15) a (16) do vztahu (13) a (14) dostaneme vztah číslo (17), který udává přímý výpočet střední radiační teploty [5].

$$t_r = 100 \sqrt[4]{91,88 - \frac{K_1 - K_2}{3,7}} - 273,15 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (17)$$

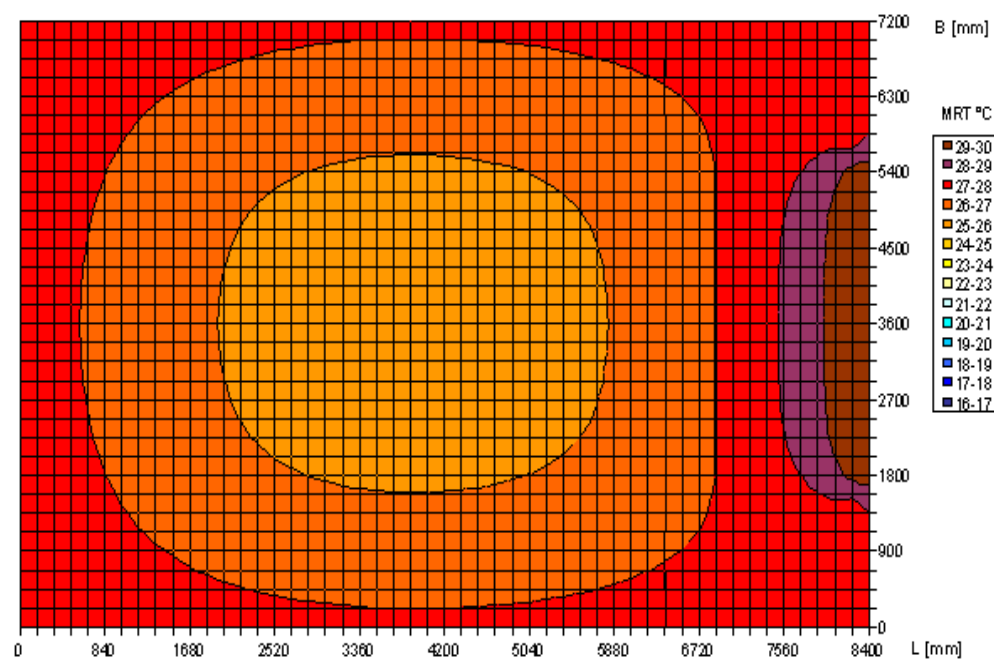
4.2.5 Využití softwaru MRT Analysis

Pro určování střední radiační teploty jsou naprogramovány softwarové utility, které umožňují určení střední radiační teploty společně s jejich vizualizací. Mezi takovéto programy patří např. softwarový produkt MRT Analysis. Tento program umožňuje vyhodnocení střední radiační teploty t ve formě izomap v libovolně zvolené rovině analyzovaného prostoru. Program je určen k analýze střední radiační teploty pro místnosti s navzájem kolmými stěnami. Do programu je možno zavést parametry jako jsou teploty, specifikace povrchů, požadované hustoty mřížek, v kterých se střední radiační teplota vyhodnocuje. [8]

Grafická ukázka tohoto zpracování vstupních dat je na Obr. 8 a Obr. 9. Příklad zobrazuje místnost o rozměrech $8,4 \text{ m} \times 7,2 \text{ m} \times 2,7 \text{ m}$, chlazenou stropem o povrchové teplotě $18 \text{ }^\circ\text{C}$, dále se v místnosti nachází okno o povrchové teplotě $35 \text{ }^\circ\text{C}$. Výpočet střední radiační teploty v místnosti je prováděn v síti 50×32 bodů. Obr. 8 zobrazuje vyhodnocení střední radiační teploty ve svislé rovině nacházející se ve středu místnosti a Obr. 9 zobrazuje toto vyhodnocení v horizontální rovině $1,1 \text{ m}$ nad zemí. [8]



Obr. 8 Příklad vyhodnocení střední radiační teploty – svislá rovina. [8]



Obr. 9 Příklad vyhodnocení střední radiační teploty – horizontální rovina. [8]

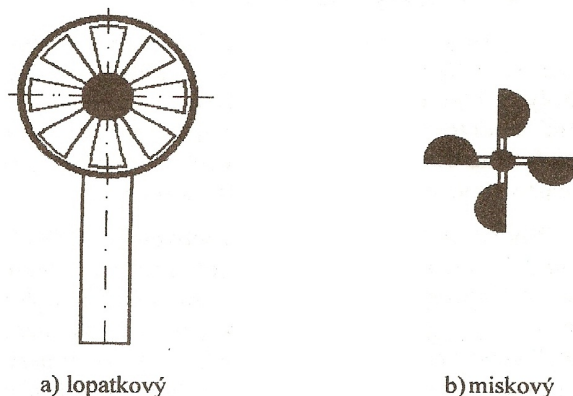
4.3 Měření rychlosti proudění vzduchu

Rychlost proudění vzduchu v pracovním prostředí se měří pomocí přístrojů, které jsou schopny stanovit malé rychlosti vzduchu a to do $0,5 \text{ m.s}^{-1}$ až 1 m.s^{-1} . Podle způsobu měření se rozdělují na:

- ◆ rotační anemometry
- ◆ žárové anemometry
- ◆ katateploměry
- ◆ dynamické rychlostní sondy [1]

4.3.1 Rotační anemometry (lopatkové a miskové)

Rotační anemometry měří rychlost proudění na základě využití silových účinků proudícího vzduchu. Lopatkové anemometry mají práh citlivosti $0,2 \text{ m.s}^{-1}$ až $0,3 \text{ m.s}^{-1}$ i menší, záleží na velikosti oběžného kola. Miskové anemometry mají nižší práh citlivosti při vyšších rychlostech vzduchu než anemometry lopatkové. [1]



Obr. 10 Rotační anemometr lopatkový a miskový. [3]

4.3.2 Žárové anemometry (termoanemometry)

Žárové anemometry (termoanemometry) měří rychlost proudění vzduchu na základě ochlazování elektricky žhaveného elementu. Měření se může provádět dvojím způsobem. První způsob je takový, že se žhavený element zahřívá na konstantní teplotu a výsledná rychlost je poté stanovena z velikosti odebraného proudu na zahřívání, nebo je žhavený element zahříván konstantním výkonem a výsledná rychlost proudění je stanovena z úbytku teploty na žhaveném elementu. Žárové anemometry jsou schopny měřit i velice malé rychlosti proudění, řádově od několika cm.s^{-1} . Žhavený element je obvykle drátek, který musí být orientován kolmo na směr proudění vzduchu. Žhavené drátky bývají z platiny, niklu, wolframu nebo jejich slitin. [1]



Obr. 11 Žárový anemometr Testo 454. [9]

4.3.3 Katateploměry

Hillův katateploměr měří rychlost proudění vzduchu na základě rychlosti odvodu tepla, je určen pro měření rychlostí proudění vzduchu do rychlostí 1 m.s^{-1} . Samotný katateploměr se skládá z válcové nádoby s kulovým dnem, která přechází v kapiláru, jenž je nahoře rozšířena. Na kapiláře jsou vyznačeny dvě teploty, 35°C a 38°C .

Při měření zahřejeme katateploměr tak, aby teploměrná kapalina vystoupila až do horní části kapiláry, nad bod s 38°C . Poté vezmeme katateploměr na místo, kde chceme měřit proudění a zavěsíme na stojan. Stopkami měříme čas τ , za který se teploměrná kapalina ochladí z 38°C na 35°C . Zároveň změříme teplotu vzduchu v místě měření. Z času τ je možno stanovit měrný tepelný tok distribuovaný do okolí (nazývaný katahodnota), který je v případě, kdy se teplota okolních zdrojů tepla příliš neliší od teploty vzduchu, popsán rovnicí [3], [5]:

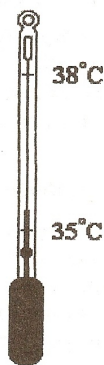
$$\dot{q} = K = \frac{Q}{\tau} = (\alpha_c + \alpha_r)(36,5 - t_a) = \alpha(36,5 - t_a) [\text{W.m}^{-2}], \quad (18)$$

kde α [$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$] je celkový součinitel přestupu tepla, který je dán rovnicemi [5]:

$$\alpha = 8,58 + 16,12.\sqrt{w} \quad [\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}] \text{ pro } w \leq 1 \quad (19)$$

$$\alpha = 4,40 + 20,31.\sqrt{w} \quad [\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}] \text{ pro } w > 1. \quad (20)$$

Větší přesnosti je dosaženo, pokud je použita závislost $\alpha=f(w)$ získaná kalibrací pro daný katateploměr. Měření rychlosti proudění katateploměrem je nepohodlné, pro běžné použití není vhodný. Lze jej však používat jako sekundární etalon pro kalibraci termoanemometrů.



Obr. 12 Katateploměr dle Hilla. [3]

4.4 Měření vlhkosti vzduchu

K měření vlhkosti vzduchu je používáno několik postupů, které jsou založeny na schopnosti některých látek udržovat svoji vlhkost v rovnováze s vlhkostí okolí, absorpci látek, principu adiabatického ochlazování, určování rosného bodu. Nejvíce jsou využívány vlhkoměry (hygrometry) a psychrometry. Vlhkost vzduchu bývá nejčastěji udávána relativní vlhkostí φ nebo absolutní vlhkostí Φ . [1][5]

4.4.1 Gravimetrická metoda

Absolutní gravimetrická (váhová) metoda měření vlhkosti využívá principu změny hmotností. Měřený vzorek vzduchu je vysušen látkou, která absorbuje vlhkost (např. pentoxid fosforu) a poté je

zjišťován přírůstek hmotnosti sušidla, pomocí níž se vypočte výsledná vlhkost. Pro vysušení vzduchu jsou používány i jiné postupy, jako např. prosávání vzduchu přes sušící látku nebo kondenzační metoda, kde dochází ke kondenzačnímu odvlhčení v chladiči. Měření je zdlouhavé a použitelné pouze v laboratorních podmínkách, ale je velice přesné. Slouží především k ověřování a kalibracím měřících zařízení. [5]

4.4.2 Dilatační vlhkoměry (hygrometry)

Vlhkoměry jsou nejčastěji používány v zapisovacích přístrojích (hygrografech) a k orientačnímu měření vlhkosti. Při měření je využívána délková roztažnost některých organických materiálů při styku s vlhkostí. Vlhkoměrná látka po čase mění své vlastnosti, avšak lze ji regenerovat umístěním do prostředí nasyceného vodními parami. [1]

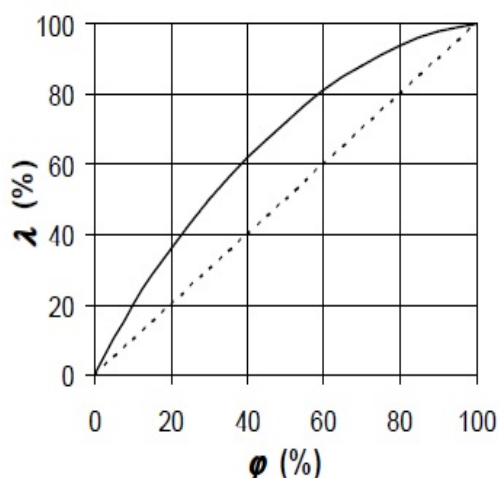
➤ Vlasový hygrometr

Vlasový hygrometr je zobrazen na Obr. 14. Je jedním z nejběžněji používaných hygrometrů. Je určen především pro přístroje, které jsou určeny pro laiky a pro měření v meteorologii, kde jsou měření zapisovány do grafů. Tato metoda využívá poměrného prodloužení λ svazku odmaštěných lidských vlasů v závislosti na měnící se relativní vlhkosti φ dle vztahu [8]:

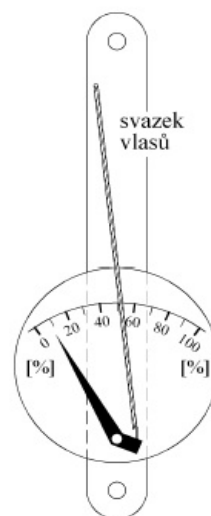
$$\lambda = k.T.\log \varphi \quad [-] \quad (21)$$

Poměrné prodloužení vlasu je znázorněno na Obr. 13. Z tohoto grafu je zřejmé, že závislost poměrného prodloužení λ není přímo úměrné relativní vlhkosti φ . Při nárůstu relativní vlhkosti φ z 0 % na 100 % dojde k prodloužení svazku vlasů o 2,5 % jejich původní délky, avšak při prodloužení svazku vlasů o 1,25 %, což je polovina jejich maximálního prodloužení, se relativní vlhkost φ změní z 0 % na 28 %. [8]

U vlhkoměrné látky dochází v průběhu času ke změně jejích vlastností a je nutno ji regenerovat. Regenerace je prováděna tak, že je vlhkoměrná látka na několik hodin umístěna do prostředí, které je nasyceno vodními parami $\varphi=100$ %. Čidla hygrometrů je nutno regenerovat před každým měřením, při dlouhodobém měření je tuto regeneraci nutno provést nejméně jednou týdně. Při měřeních v suchém prostředí je nutno tento postup provádět častěji. Hygrometry, které jsou umístěny ve venkovním prostředí, není nutno regenerovat, jelikož jsou regenerovány přes noc, kdy dojde k jejich regeneraci vlivem snížení venkovní teploty, která způsobí nárůst relativní vlhkosti až na mez nasycení vzduchu vodními parami. [8]



Obr. 13 Závislost λ na φ . [8]



Obr. 14 Vlasový hygrometr. [8]

4.4.3 Psychrometry

Psychrometry jsou používány zejména v laboratorních a provozních podmínkách. Měření pomocí psychrometrů využívá principu měření teploty mezního adiabatického ochlazení, což je teplota vody, při níž je veškeré teplo potřebné k izobarickému odpaření vody z povrchu přenášeno konvekcí ze vzduchu. Tato teplota se dá měřit vlhčeným teploměrem aspiračního psychrometru. [1]

➤ Assmanův aspirační psychrometr

Assmanův aspirační psychrometr se skládá z dvou teploměrů, které jsou nuceně větrány ventilátorem, rychlost proudění vzduchu je od 2 m.s^{-1} do 3 m.s^{-1} . Samotné teploměry jsou chráněny před sáláním dvojitým krytem. Punčoška mokrého teploměru je vlhčena destilovanou vodou. Prouděním vzduchu kolem mokrého teploměru se voda začíná odpařovat a ochlazuje se na teplotu t_m , tzv. teplotu mokrého teploměru. Druhým teploměrem se měří teplota t , tzv. teplota suchého teploměru.

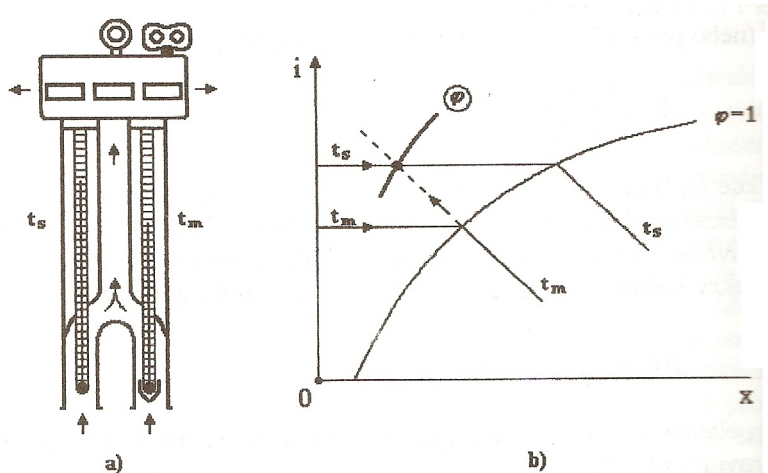
Z naměřených teplot suchého a vlhkého teploměru se relativní vlhkost určuje z diagramu, který bývá přiložen k přístroji, nebo z i-x diagramu vlhkého vzduchu. Bod charakterizující stav měřeného vzduchu v i-x diagramu je průsečíkem izotermie mokrého teploměru t_m prodloužené z oblasti vzduchu přesyceného vlhkostí a izotermie suchého teploměru t . Tento postup je znázorněn na Obr. 15. [1]

Ke stanovení relativní vlhkosti se používá Sprungova vztahu [1]:

$$p_p = p_{pm}'' - 66 \cdot (t - t_m) \text{ [Pa]}. \quad (22)$$

Relativní vlhkost určíme dle vztahu [1]:

$$\varphi = \frac{\rho_p}{\rho_{p''}} \cdot 100 = \frac{p_p}{p_{p''}} \cdot 100 \text{ [%]}. \quad (23)$$



Obr. 15 Assmanův aspirační psychrometr. [3]

a) schéma Assmanova psychrometru, b) vyhodnocení relativní vlhkosti v i-x diagramu

4.5 Tepelný stav mikroklimatu

Výsledný tepelný stav prostředí se skládá z více faktorů, mezi které patří teplota vzduchu t ve $^{\circ}\text{C}$, střední radiační teplota t_r , rychlost proudění vzduchu w a relativní vlhkost vzduchu ϕ . Avšak jsou zde i další důležité faktory, které ovlivňují stav mikroklimatu, jako je rovnoměrnost teplot v prostoru, asymetrie radiační teploty a intenzita turbulence proudícího vzduchu. Pro zjednodušení měření a hodnocení výsledného tepelného stavu byly vypracovány metody a sestrojeny přístroje, které v jedné veličině zahrnují několik těchto základních veličin. Mezi nejčastěji používané přístroje pro měření výsledného tepelného stavu prostředí patří kulový teploměr (viz 4.2.1), katateploměr dle Hilla (viz 4.3.3) a měřič tepelného komfortu, který je zobrazen na Obr. 16. [1], [3]

4.5.1 Katateploměr dle Hilla

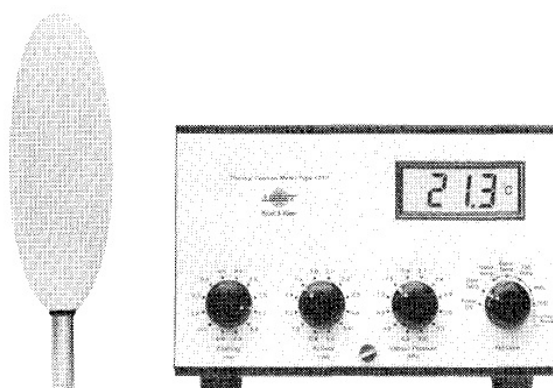
Katateploměr dle Hilla zobrazený na Obr. 12, popsáný v podkapitole 4.3.3 měří výsledný tepelný stav prostředí, daný teplotou vzduchu, teplotou okolních ploch a rychlostí proudění vzduchu. Výsledný tepelný stav je popisován katahodnotou, jež je popsána vztahem (18). Optimální katahodnoty, odpovídající stavu tepelné pohody, jsou [1]:

člověk v klidu	$K = 190 \text{ W.m}^{-2}$
lehká práce	$K = 250 \text{ W.m}^{-2}$
středně těžká práce	$K = 340 \text{ W.m}^{-2}$

Používání katateploměru dle Hilla pro měření výsledného tepelného stavu mikroklimatu se omezuje, jelikož ochlazování katateploměru v proudícím vzduchu je intenzivnější než ochlazování lidského těla a také přenos tepla zářením mezi člověkem a okolními plochami se neshoduje se zářením mezi katateploměrem a okolními plochami [1].

4.5.2 Měřič tepelného komfortu

Mezi speciální přístroje určené přímo k měření tepelného stavu mikroklimatu patří například měřič tepelného komfortu od firmy Brüel & Kjær. Tento přístroj je přenosný a je určený pro měření ve velké škále různých prostředí. Přístroj je vybaven snímačem, jehož parametry odpovídají tepelným parametrům lidského těla. Snímač je ohříván na určitou teplotu a v daném prostředí je ochlazován konvekcí a zářením. Na přístroji je nutno nastavit parametry tělesné činnosti, parciálního tlaku vodní páry ve vzduchu a tepelného odporu oděvu. Přístroj měří střední radiační teplotu a na základě rovnice tepelné pohody prostředí dokáže určit hodnoty PMV , PPD , rozdíl teploty od pohodové teploty atd. [1]



Obr. 16 Měřič tepelného komfortu firmy Brüel & Kjær model 1212. [10]

5 ZÁVĚR

V této bakalářské práci jsem se zabýval parametry vnitřního pracovního prostředí a možnostmi jejich měření. Práce se zaměřuje především na základní parametry, jako jsou teplota, proudění vzduchu, vlhkost vzduchu a střední radiační teplota. U každého typu měření jsou uvedeny vybrané principy, kterých tyto měření využívají.

V první části práce byla uvedena definice a důležitost stanovení jednotlivých parametrů pracovního prostředí, včetně jednotlivých činitelů, které na pracovní prostředí působí a s kterými se můžeme v pracovním prostředí setkat. Společně s tímto zde byl také uveden pojem tepelné pohody a způsoby, kterými jí může být dosaženo.

Druhá část se zabývala specifikací některých vybraných parametrů pracovního prostředí, které byly rozděleny do dvou základních skupin. První skupinou byly parametry měřitelné, které jsme schopni měřit pomocí technických zařízení, mezi tyto parametry patří např. teplota, střední radiační teplota, tlak, hluk atd. Druhou skupinou jsou parametry statistické, které uvádějí statistický odhad procentuálně spokojených a nespokojených, mezi tyto parametry se řadí ukazatel *PMV*, *PPD* a *DR*.

Poslední, nejobsáhlejší část práce, se zabývá měřením jednotlivých vybraných parametrů. Parametry, které byly vybrány do této části, byly zvoleny s ohledem na to, jaký mají vliv na osoby v daném pracovním prostředí. Pro měření většiny veličin, uvedených v kapitole 4, jsou předepsány normy pro postupy při jednotlivých měřeních, z kterých by se mělo vycházet, pokud nepožadujeme pouze informativní povahu jednotlivých parametrů. Vzhledem k rozsahu práce nebylo možno uvést u jednotlivých parametrů všechny metody měření.

Vliv pracovního prostředí na kvalitu práce a pobytu osob v tomto prostředí je zásadní. Pokud chceme nějakým způsobem regulovat parametry pracovního prostředí, abychom dosáhli ideálního stavu, musíme tyto parametry nejdříve změřit s požadovanou přesností. Po změření dostaneme výchozí hodnotu parametru, který nadále můžeme regulovat na námi požadovanou hodnotu. Přiblížíme-li se optimálním parametrům pracovního prostředí, dojde k pozitivnímu ovlivnění výkonů a kvality práce osob v tomto prostředí. Avšak budou-li hodnoty parametrů značně vzdáleny parametrům optimálním, může docházet ke zdravotním problémům. Pro tento případ je většina krajních hodnot parametrů pracovního prostředí uvedena v hygienických normách. Tyto parametry nemohou být překračovány, nebo musí být provedeny náležité opatření.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] JANOTKOVÁ, Eva. *Technika prostředí*. 1. vydání. Vysoké učení technické Praha : Čs. redakce MON, 1991. 201 s. ISBN 80-214-0258-X.
- [2] NOVÝ, Richard. *Technika prostředí*. 2. přepracované vydání. Praha: ČVUT, 2006. 267 s. ISBN 80-01-03492-5.
- [3] PAVELEK, Milan; ŠTĚTINA, Josef. *Experimentální metody v technice prostředí*. 3. vydání. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2007. 215 s. ISBN 978-80-214-3426-4.
- [4] ČSN ISO 7726: 1993. *Tepelné prostředí : Přístroje a metody měření fyzikálních veličin*. Praha : Český normalizační institut, 40 s.
- [5] MATUŠKA, Tomáš; MAREŠ, Luděk. *Experimentální metody I*. [online]. 1. vydání. Praha, 2009 [cit. 2011-05-09]. Dostupné z WWW: https://ib.cvut.cz/sites/default/files/Studijni_materialy/Matuska_Mares_Experimentalni_metody_1.pdf.
- [6] ŠTĚTINA, Josef. *Termomechanika : Studijní pomůcky (opora) pro kombinovanou formu bakalářského studia*. [online]. [cit. 2011-05-03]. Dostupný z WWW: <http://ottp.fme.vutbr.cz/skripta/termomechanika/I-x-1024.gif>.
- [7] ČSN EN ISO 7730: 1997. *Mírné tepelné prostředí : Stanovení ukazatelů PMV a PPD a popis podmínek tepelné pohody fyzikálních veličin*. Praha : Český normalizační institut, 1997. 36 s.
- [8] ZMRHAL, Vladimír. *Stanovení střední radiační teploty (II)* [online]. 2006, [cit. 2011-05-14]. Dostupný z WWW: <http://www.tzb-info.cz/3102-stanoveni-stredni-radiacni-teploty-ii>
- [9] Katalog Testo. Zam servis [online]. [cit. 2011-05-14]. Dostupné z WWW: http://www.zam.cz/KATALOG_TESTO/TESTO/PDF_FILES/454.pdf.
- [10] OLESEN, B. W. Thermal Comfort. *Technical Review: To Advance Techniques in Acoustical Electrical and Mechanical Measurement*. [online]. 1982, No.2, [cit. 2011-05-04]. Dostupný z WWW: <http://www.bksv.com/doc/technicalreview1982-2.pdf>. ISSN 0007-2621.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Značka	Název	Jednotka
D	vnější průměr koule kulového teploměru	m
f_{od}	poměr povrchu těla pokrytého oděvem a povrchu neoblečeného těla	-
h	entalpie vdechovaného vzduchu	$\text{J.kg}^{-1}_{\text{s.v.}}$
h_{vyd}	entalpie vydechovaného vzduchu	$\text{J.kg}^{-1}_{\text{s.v.}}$
k	konstanta hygrometru	K^{-1}
K	katahodnota	W.m^{-2}
K_1	katahodnota Hillova katateploměru	W.m^{-2}
K_2	katahodnota katateploměru s pokovenou baňkou	W.m^{-2}
L	rozdíl energetického výdeje a tepla odvedeného bez mokrého pocení	W
n	fyzický výkon	W.m^{-2}
p_d	parciální tlak vodních par ve vzduchu	Pa
p_p	celkový tlak vlhkého vzduchu	Pa
p_p''	parciální tlak sytých vodních par	Pa
p_{pm}''	parciální tlak syté vodní páry o teplotě t_m	Pa
P_1	příkon dodaný leštěnému čidlu	W
P_2	příkon dodaný černému čidlu	W
P_S	dodávka tepla čidlu	W
q	energetický výdej člověka	W
\dot{q}	měrný tepelný tok	W.m^{-2}
q_1	teplo sdílené Hillovým katateploměrem	J.m^{-2}
q_2	teplo sdílené katateploměrem s pokovenou baňkou	J.m^{-2}
q_m	měrný energetický výdej	W.m^{-2}
Q	cejchovní hodnota katateploměru	J.m^{-2}
R	elektrický odpor	Ω
R_0	elektrický odpor při teplotě t_0	Ω
S	povrch lidského těla	m^2
t	teplota vzduchu	$^{\circ}\text{C}$
t_0	střední teplota vyčnívající části kapalinového teploměru	$^{\circ}\text{C}$
t_a	teplota okolního vzduchu	$^{\circ}\text{C}$
t_m	teplota mokrého teploměru	$^{\circ}\text{C}$
t_{od}	teplota oděvu	$^{\circ}\text{C}$

t_r	střední radiační teplota	°C
t_x	teplota naměřená kapalinovým teploměrem	°C
Δt	rozdíl mezi teplotou naměřenou a skutečnou	°C
T	teplota vzduchu	K
T_g	výsledná teplota naměřená kulovým teploměrem	K
T_r	střední radiační teplota	K
T_S	absolutní teplota čidla	K
Tu	místní intenzita turbulence	%
w	rychlost proudění vzduchu	m.s ⁻¹

Řecká abeceda

α	součinitel přestupu tepla	W.m ⁻² .K ⁻¹
α_c, α_k	součinitel přestupu tepla konvekcí	W.m ⁻² .K ⁻¹
α_r	součinitel přestupu tepla sáláním	W.m ⁻² .K ⁻¹
α_{r1}	součinitel přestupu tepla konvekcí pro skleněný katateploměr	W.m ⁻² .K ⁻¹
α_{r2}	součinitel přestupu tepla konvekcí pro katateploměr s	W.m ⁻² .K ⁻¹
β_r	součinitel objemové roztažnosti teploměrné kapaliny	K ⁻¹
β_s	součinitel objemové roztažnosti skla	K ⁻¹
ε	poměrná zářivost povrchu koule kulového teploměru	-
ε_1	poměrná emisivita leštěné koule	-
ε_2	poměrná emisivita černé koule	-
ε_s	poměrná emisivita čidla	-
λ	relativní prodloužení	-
ρ_p	hustota vlhkého vzduchu	kg.m ⁻³
ρ_p''	hustota sytých vodních par	kg.m ⁻³
σ_0	Stefan-Boltzmanova konstanta	W.m ⁻² .K ⁻⁴
τ	čas	s
τ_1	čas chladnutí skleněného katateploměru	s
τ_2	čas chladnutí katateploměru s pokovenou baňkou	s
φ	relativní vlhkost vzduchu	-
Φ	absolutní vlhkost vzduchu	kg.m ⁻³

Zkratky

<i>PMV</i>	předpověď středního tepelného pocitu	-
<i>PPD</i>	procentuální podíl nespokojených	-
<i>DR</i>	stupeň obtěžování průvanem	-